

# **RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE LOS CAUDALES MENSUALES A LO LARGO DE LA RED DE DRENAJE DE COLOMBIA**

Tesis de maestría presentada por:  
Ernesto Roldán Taborda, I.C.

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar por el  
título de Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN  
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos  
Facultad de Minas  
Medellín, Agosto de 2009

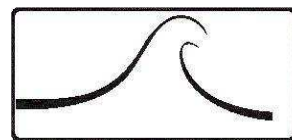
# **RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE LOS CAUDALES MENSUALES A LO LARGO DE LA RED DE DRENAJE DE COLOMBIA**

Tesis de maestría presentada por:  
Ernesto Roldán Taborda, I.C.

Director:  
Ph.D. Oscar José Mesa Sánchez



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA



POSGRADO EN APROVECHAMIENTO  
DE RECURSOS HIDRAULICOS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN  
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos  
Facultad de Minas  
Medellín, Agosto de 2009

## RESUMEN

Se implementó un modelo mensual de balance de agua distribuido para estimar los caudales medios mensuales cualquier punto de la red hidrográfica de Colombia, en el período comprendido entre los años 1975 y 2005. Se utilizó una adaptación del modelo GR2M, el cual responde a un esquema que consta de dos tanques: un tanque de producción, asociado al almacenamiento de agua en el suelo, y un tanque de tránsito. Dentro de la estructura del modelo se consideraron tres parámetros: la máxima capacidad de almacenamiento del tanque de producción ( $X_1$  [mm]), la máxima capacidad de almacenamiento del tanque de tránsito ( $X_4$  [mm]), y un parámetro de intercambio de aguas subterráneas ( $X_5$ ). Para la desagregación del modelo, la cuenca se discretizó en laderas y la red de drenaje en segmentos.

La región seleccionada como zona de estudio se encuentra comprendida entre las latitudes  $-5^\circ$  S y  $15^\circ$  N, y las longitudes  $-80^\circ$  W y  $-65^\circ$  W. Para la definición de las cuencas y las direcciones de drenaje se trabajó con un Modelo de Elevación Digital (MED) con una resolución de 1 km, y con una red de drenaje extraída del MED. Para la ejecución del modelo de balance de agua se requiere información de Precipitación y Evaporación Potencial. Para la construcción de los mapas de evaporación potencial se recopiló información a distintas escalas espaciales de temperatura, humedad relativa y radiación solar. Los mapas de evaporación potencial se calcularon a partir de las ecuaciones de Turc Modificado y Thornthwaite. Se utilizaron los mapas de precipitación elaborados en la tesis de maestría “Estimación de los Campos Mensuales Históricos de Precipitación en el Territorio Colombiano”. Para la evaluación de los caudales simulados se cuenta con información en 330 estaciones de caudal.

El parámetro  $X_1$  se estimó en función de la precipitación y la evaporación potencial. Se adoptó un valor de  $X_4 = 60$  mm para toda la zona de estudio, debido a que los resultados obtenidos en el proceso de calibración y validación indican que a nivel global el modelo no es sensible a las variaciones de este parámetro. En términos generales el modelo presenta un mejor desempeño en las cuencas de mayor área. Teniendo en cuenta el error asociado a la medición del área de una cuenca a partir de un MED, se utilizó un factor de corrección de área sobre los caudales simulados. La influencia de este factor de corrección disminuye en la medida que el área aumenta. Al utilizar los mapas de evaporación potencial de Thornthwaite y Turc Modificado, se obtienen resultados similares. Por razones prácticas se escogió trabajar con los mapas elaborados a partir de la ecuación de Thornthwaite, debido a que la información de la cual estos dependen, está disponible para un mayor intervalo de tiempo.

La baja calidad de la información disponible es la principal fuente de error en los resultados del modelo. Cuando el balance hídrico de largo plazo no se cumple, se encontró que los errores del modelo son grandes. Aunque algunas cuencas exhiben errores en el cierre del balance poco significativos, en general la magnitud de los errores no es pequeña (la raíz cuadrática media de los errores relativos en porcentaje es 37.9%). La fuente de error en el cierre del balance reside principalmente en los errores de estimación y medición de las variables involucradas.

Los resultados encontrados indican que el modelo utiliza el parámetro de intercambio de aguas subterráneas para cubrir los errores de balance, por lo tanto se considera pertinente no tener en cuenta este parámetro para la simulación de caudales, debido a la falta de información que permita evaluar la validez de  $X_5$  como un parámetro para el modelamiento del flujo subterráneo.

Se analizó la relación entre las diferentes componentes del ciclo hidrológico en las 35 cuencas donde el modelo tuvo un mejor desempeño. De estas 35 cuencas 23 se encuentran en la región oriental de la zona de estudio. Los resultados obtenidos indican que existe una relación estrecha entre el almacenamiento de agua en el suelo en un mes dado y la precipitación del mes anterior, mientras que para el modelo, el contenido de agua en el tanque de tránsito depende principalmente de la precipitación del mismo mes. En general el contenido de agua en el suelo responde a los incrementos en la precipitación de forma positiva, sin embargo en los períodos en los cuales la evaporación real excede a la precipitación, el nivel de agua en el suelo disminuye aunque la precipitación aumente localmente. La ocurrencia de estos períodos de déficit, están muy localizados temporalmente según el ciclo anual de la precipitación y la evaporación, y en un menor grado están afectados por los fenómenos que afectan la variación interanual de estas variables. Se encontró que existe una relación directa entre el almacenamiento de agua en la cuenca y el caudal. Esta relación exhibe características del efecto de histéresis.

Finalmente se analizaron los resultados obtenidos para la evaporación real a partir del modelo de balance de agua implementado. La relación entre la evaporación real y potencial indica que la mayor parte de la zona de estudio está caracterizada por un clima húmedo. Los lugares más secos se encuentran al norte de la zona de estudio sobre la región Caribe.

## ABSTRACT

A distributed monthly water balance model was implemented in order to estimate monthly flows in any point in the Colombian hydrographic network during the period between 1975 and 2005. It was used an adaptation of the GR2M model, which responds to a scheme that consists of two tanks: a production store, associated with the soil moisture store, and a routing store. Within the structure of the model three parameters were considered: the maximum capacity of the storage of the production store ( $X_1$  [mm]), the maximum capacity of storage of the transition tank ( $X_4$  [mm]), and an underground water exchange parameter ( $X_5$ ). For the disaggregation of the model, the basin was divided into hillslopes and the river network in links.

The latitude and the longitude of the region selected as a focus of study is between  $-5^\circ$  S and  $15^\circ$  N, and between  $-80^\circ$  W and  $-65^\circ$  W. To define the basins and the drain directions, a Digital Elevation Model – DEM was used with a resolution of 1 km., and with a drainage network extracted from the DEM. To execute the water balance model, information on precipitation and potential evaporation was required. For the construction of the maps of potential evaporation, data was collected at different spatial scales of temperature, relative humidity and solar radiation. The maps of potential evaporation were calculated with the equations of Turc and Thornthwaite. The maps of precipitation prepared in the Master's thesis "Estimation of the Historical Monthly Fields of Precipitation in the Territory of Colombia" were used. To evaluate the simulated flows, data from 330 flow gauging stations were used.

The parameter  $X_1$  was estimated as a function of the precipitation and the potential evaporation. For the zone of study the value of  $X_4 = 60$  mm was used, since the results obtained in the process of calibration and validation indicate that globally the model is not susceptible to the variations of this parameter. Generally speaking, the model works better in basins covering larger areas. Considering the errors associated with the measurement of the area of a basin using a DEM, a correction factor of area was implemented over the simulated flows. The influence of this correction factor decreases as the area increases. When using the maps of potential evaporation from Thornthwaite and Turc, similar results are obtained. For practical reasons, the maps produced with the equation of Thornthwaite were selected to work with, considering that the information on which these depend, is available for a greater time interval.

The low quality of available information is the main source of error in the model results. When the long-term water balance is not met, it was found that the model errors are large. Although there are some basins that exhibit small errors, the overall magnitude of the measured errors is not small (the root mean square of the relative percent errors 37.9%). The main source of errors in the closure of the water balance resides mainly in the errors of estimation and measurement of the variables involved.

The results found indicate that the model uses the underground water exchange parameter to cover the errors in the balance. For this reason, it is recommended not to consider this parameter for the stream flow simulation, due to the lack of information that would permit the evaluation of the validity of  $X_5$  as a parameter for the modeling of the groundwater runoff.

The relation between the different components of the hydrologic cycle in the 35 basins, where the model had a better performance, was analyzed. Of these 35 basins, 23 are found in the eastern region of the area of study. The results obtained indicate that there is a close relationship between the storage of

soil water in a given month and the precipitation of the previous month, while for the model, the water content in the routing store depends principally on the precipitation during the month itself.

In general, the content of soil water responds to the increases in precipitation. However, during the periods in which the actual evaporation exceeds the precipitation, the soil water level decreases, although the precipitation increases locally. The occurrence of these periods of deficit, are highly localized temporarily in the annual cycle of precipitation and evaporation, and are less affected by the phenomena that affect the interannual variation of these variables. It was found that a direct relationship exists between the storage of water in the basin and the flow. This relationship exhibits characteristics from the effect of hysteresis.

Finally, the results obtained for the actual evaporation from the implemented water balance model were analyzed. The relationship between the actual and potential evaporation indicates that most of the area of study is characterized by a humid climate. The driest places are found in the north of the area of study in the Caribbean region.

## ÍNDICE GENERAL

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>X</b>
-------------------------------	----------

<b>Lista de Tablas .....</b>	<b>XXVI</b>
------------------------------	-------------

<b>1    Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1    Estructura del documento .....	1
1.2    Objetivos .....	2
1.2.1    Objetivo General.....	2
1.2.2    Objetivos Específicos.....	2
1.3    Antecedentes .....	3
1.3.1    Modelación del proceso lluvia escorrentía .....	3
1.3.2    Modelos escala mensual.....	5
1.3.3    Experiencias en Colombia.....	6
1.4    Metodología .....	8
 <b>2    Modelo mensual de balance de agua.....</b>	<b>11</b>
2.1    Modelo GR2M .....	11
2.1.1    Almacenamiento de agua en el suelo .....	13
2.1.2    Infiltración:.....	13
2.1.3    Evaporación real .....	14
2.1.4    Percolación .....	15

2.1.5	Tránsito de escorrentia .....	16
2.1.6	Flujo de agua subterranea.....	16
2.2	Desagregación del modelo .....	17
2.3	Implementación del modelo.....	19
<b>3</b>	<b>Información .....</b>	<b>21</b>
3.1	MED y red de drenaje.....	21
3.2	Evaporación Potencial .....	22
3.2.1	Humedad Relativa.....	25
3.2.2	Radiación.....	25
3.2.3	Temperatura.....	28
3.2.4	Mapas de Evaporación Potencial.....	38
3.3	Precipitación.....	40
3.4	Caudal.....	40
<b>4</b>	<b>Calibración y validación del modelo.....</b>	<b>43</b>
4.1	Calibración.....	43
4.1.1	Parámetro $X_I$ .....	43
4.1.2	Parámetro $X_d$ .....	45
4.1.3	Validación .....	48
<b>5</b>	<b>Simulación de caudales .....</b>	<b>54</b>
5.1	Simulación de caudales período 1975 - 2005.....	54
5.2	Caudal medio de largo plazo.....	58
5.3	Corrección por balance .....	62



5.4	Parámetro $X_5$ .....	64
5.5	Ciclo anual de la evaporación potencial .....	67
<b>6</b>	<b>Componentes del ciclo hidrológico .....</b>	<b>70</b>
6.1	Series de tiempo de las componentes del ciclo hidrológico.....	73
6.2	Ciclo Anual de las componentes del ciclo hidrológico.....	86
6.3	Periodos donde $P < E_s$ .....	98
6.4	Relación entre los suministros y las salidas de la cuenca .....	100
6.5	Relación entre el almacenamiento de agua en la cuenca y el caudal.....	114
<b>7</b>	<b>Evaporación.....</b>	<b>128</b>
7.1	Comparación entre métodos de estimación de la evaporación real media multianual .....	128
7.2	Evaporación relativa .....	132
7.3	Relación entre la evaporación real y potencial.....	133
	<b>Conclusiones.....</b>	<b>137</b>
<b>A.</b>	<b>Base de Datos.....</b>	<b>140</b>
A.1	HidroSIG 4.0.....	140
A.2	MATLAB.....	144
	<b>Referencias.....</b>	<b>146</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1	Diferencia entre los procedimientos para: (a) El mejoramiento de un modelo, (b) El mejoramiento en el ajuste de un modelo. (Tomado de Gupta, 2007) .....	4
Figura 1-2	Esquema del modelo de tanques propuesto en el proyecto Balances hidrológicos de Colombia (Tomado de Vélez et al., 2000) .....	7
Figura 1-3	Esquema del modelo de interacción suelo-atmósfera (Tomado de Vélez et al., 2002)....	7
Figura 1-4	Esquema del modelo GR2M (Tomado de Mouelhi et al., 2006).....	8
Figura 2-1	Diagrama del modelo GR2M (Tomado de Mouelhi et al., 2006).....	12
Figura 2-2	Comportamiento de la tasa de infiltración $P_s/P$ como una función de la tasa de almacenamiento $S/X_I$ .....	14
Figura 2-3	Comportamiento de la tasa de evaporación $E_s/E$ como una función de la tasa de almacenamiento $S_I/X_I$ .....	15
Figura 2-4	Comportamiento de la tasa de percolación $P_2/X_I$ como una función de la tasa de almacenamiento $S_2/X_I$ .....	16
Figura 2-5	Comportamiento de la tasa de descarga del tanque de tránsito $Q/R_2$ como una función de la tasa de almacenamiento $R_2/X_4$ .....	17
Figura 2-6	Esquema tridimensional de una cuenca presentado por Mouelhi et al. (2006). P es la precipitación, E la evaporación potencial, Q es el caudal a la salida de la cuenca, F (perdida o ganancia) resultante de todos los flujos que atraviesan el límite lateral de la columna de suelo. ....	17
Figura 2-7	Esquema de un árbol binario y sus partes .....	18
Figura 2-8	Esquema de una cuenca dividida en laderas (Tomado de Mantilla, 2003) .....	18
Figura 2-9	Esquema del volumen de control del sistema segmento-ladera.....	19
Figura 3-1	MED de la región de estudio .....	21
Figura 3-2	Red de drenaje y desagregación en laderas de la cuenca del río Atrato.....	22
Figura 3-3	Mapa de Humedad Relativa (%) para el mes de marzo de 1948; resolución espacial: 2.5°; fuente: NCEP/NCAR <i>Reanalysis</i> .....	26

Figura 3-4	Mapa de radiación de onda corta incidente en la superficie ( $\text{W/m}^2$ ) para el mes de julio de 1983; resolución: $1^\circ$ ; fuente: ERBE .....	27
Figura 3-5	Mapa de radiación de onda corta incidente en la superficie ( $\text{W/m}^2$ ) para el mes de julio de 1983; resolución: $1^\circ$ ; fuente: NARR .....	27
Figura 3-6	Coeficiente de correlación entre los mapas de radiación de onda corta del ERBE y los mapas del NARR .....	28
Figura 3-7	Localización de las estaciones de temperatura y delimitación de las regiones en las que se divide la zona de estudio .....	29
Figura 3-8	Variación del número de datos de temperatura con el tiempo: (a) Número total de datos; (b) Número de datos por región.....	30
Figura 3-9	Regresión lineal entre la temperatura del aire en la superficie y la elevación sobre el nivel de la mar, utilizando todas las estaciones de temperatura de la zona de estudio con datos en enero de 1981	31
Figura 3-10	Variabilidad intranual de los parámetros de las regresiones lineales entre la temperatura del aire en la superficie y la elevación sobre el nivel del mar: (a) Pendiente, $\gamma$ ; (b) Intercepto, $b$ . Las regresiones fueron realizadas para cada uno de los meses del período 1975-1995, utilizando todas las estaciones de la zona de estudio con datos dentro de este período. Los puntos de color rojo corresponden a meses que pertenecen a años El Niño; los puntos azules corresponden a meses de años La Niña.....	32
Figura 3-11	Relación entre la pendiente ( $\gamma$ ) y el intercepto ( $b$ ) de las regresiones lineales entre la temperatura del aire en la superficie y la elevación sobre el nivel del mar, utilizando todas las estaciones de la zona de estudio con datos dentro del período 1975-1995 .....	33
Figura 3-12	RMSE en cada estación entre la serie observada y la serie estimada de temperatura....	37
Figura 3-13	Temperatura observada y estimada (a) en la estación 2315503 (Código IDEAM) y (b) en la estación 30580222000 (Código GHCN2).....	38
Figura 3-14	Mapa de temperatura media del aire en la superficie; resolución: $30''$ .....	39
Figura 3-15	Mapas de Evaporación Potencial (mm), resolución $30''$ , para enero de 1984, calculados a partir de la ecuación de (a) Turc Modificado y (b) Thornthwaite.....	39
Figura 3-16	(a) Mapa de Precipitación (mm) y (b) Mapa de error en la estimación de la precipitación (mm), para enero de 1984; resolución $5'$ .....	41
Figura 3-17	Localización de las estaciones de caudal en la zona de estudio .....	42

Figura 4-1	Mapas de $X_f$ (mm), calculados a partir de los mapas de evaporación potencial de (a) Turc Modificado y (b) Thornthwaite .....	44
Figura 4-2	Promedio para el período de calibración, del error en la estimación de la precipitación	46
Figura 4-3	Relación entre $A_{1km}$ y $A_{90m}$ , para las diferentes estaciones de caudal utilizadas .....	47
Figura 4-4	Valor de la función objetivo para diferentes valores de $X_d$ . (a) Utilizando los mapas de evaporación de Turc Modificado; (b) Utilizando los mapas de evaporación Thornthwaite .....	47
Figura 4-5	Valor obtenido para el criterio de Nash en las estaciones de caudal durante el período de validación. (a) Caso I; (b) Caso II; (c) Caso III; (d) Caso IV .....	49
Figura 4-6	Histogramas obtenidos para el criterio de Nash evaluado en el período de validación, en las estaciones con un área de drenaje $A \geq 2000 \text{ km}^2$ . (a) Caso I; (b) Caso II; (c) Caso III; (d) Caso IV	50
Figura 4-7	Histogramas obtenidos para el criterio de Nash evaluado en el período de validación, en las estaciones con un área de drenaje $1000 \text{ km}^2 \leq A < 2000 \text{ km}^2$ . (a) Caso I; (b) Caso II; (c) Caso III; (d) Caso IV	50
Figura 4-8	Histogramas obtenidos para el criterio de Nash evaluado en el período de validación, en las estaciones con un área de drenaje $200 \text{ km}^2 \leq A < 1000 \text{ km}^2$ . (a) Caso I; (b) Caso II; (c) Caso III; (d) Caso IV	51
Figura 4-9	Histogramas obtenidos para el criterio de Nash evaluado en el período de validación, en las estaciones con un área de drenaje $A < 200 \text{ km}^2$ . (a) Caso I; (b) Caso II; (c) Caso III; (d) Caso IV .	51
Figura 4-10	Ubicación de 8 estaciones de caudal y sus respectivas cuencas .....	52
Figura 5-1	Mapa de Caudal medio mensual ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), para enero de 1984.....	54
Figura 5-2	Caudales estimados y observados para el período 1975 -2005 para las estaciones con códigos del IDEAM (a) 3501702 (Estación Puente Lleras) y (b) 2314702 (Estación Puente Ferrocarril); (c) Ubicación de las estaciones.....	55
Figura 5-3	Valor obtenido para el criterio de Nash en las estaciones durante el período de simulación 1975 – 2005. (a) Distribución espacial de los valores de Nash; (b) Histograma de los valores de Nash.....	56
Figura 5-4	Histogramas obtenidos para el criterio de Nash evaluado en el período de simulación 1975 – 2005, en las estaciones con un área de drenaje: (a) $A < 200 \text{ km}^2$ ; (b) $200 \text{ km}^2 \leq A < 1000 \text{ km}^2$ ; (c) $1000 \text{ km}^2 \leq A < 2000 \text{ km}^2$ ; (d) $A \geq 2000 \text{ km}^2$ .....	56
Figura 5-5	Valor obtenido para el criterio de balance BIAS en las estaciones de caudal, durante el período de simulación 1975 – 2005 .....	57

Figura 5-6	Comparación entre el área de drenaje de las diferentes estaciones, con los valores obtenidos para el criterio de balance BIAS .....	58
Figura 5-7	Promedio multianual de (a) Precipitación y (b) Evaporación real, estimados para el período 1975 – 2005 .....	60
Figura 5-8	Comparación del caudal medio de largo plazo observado y estimado a partir del balance hídrico de largo plazo, en 251 estaciones de caudal .....	61
Figura 5-9	Comparación del caudal medio de largo plazo observado y estimado a partir del modelo GR2M, en 251 estaciones de caudal .....	61
Figura 5-10	Comparación del caudal medio de largo plazo estimado a partir del balance hídrico de largo plazo y el modelo GR2M .....	62
Figura 5-11	Valores del criterio de Nash, obtenidos luego de multiplicar las series simuladas en cada estación por el correspondiente valor de BIAS. (a) Distribución espacial de los valores de Nash; (b) Histograma de los valores de Nash.....	63
Figura 5-12	Histogramas para el criterio de Nash obtenido luego de multiplicar las series simuladas por el correspondiente valor de BIAS, para estaciones con un área de drenaje: (a) $A < 200 \text{ km}^2$ ; (b) $200 \text{ km}^2 \leq A < 1000 \text{ km}^2$ ; (c) $1000 \text{ km}^2 \leq A < 2000 \text{ km}^2$ ; (d) $A \geq 2000 \text{ km}^2$ .....	63
Figura 5-13	Valor de $X_5$ obtenido en cada una de las cuencas de las diferentes estaciones de caudal. (a) Ubicación de las estaciones de caudal; (b) Cuencas asociadas a las estaciones de caudal .....	64
Figura 5-14	Valores estimados para el criterio de Nash en las estaciones de caudal, considerando el parámetro $X_5$ . (a) Distribución espacial de los valores de Nash; (b) Histograma de los valores de Nash .....	65
Figura 5-15	Histogramas para el criterio de Nash obtenido al considerar el parámetro $X_5$ en la simulación de caudales, para estaciones con un área de drenaje: (a) $A < 200 \text{ km}^2$ ; (b) $200 \text{ km}^2 \leq A < 1000 \text{ km}^2$ ; (c) $1000 \text{ km}^2 \leq A < 2000 \text{ km}^2$ ; (d) $A \geq 2000 \text{ km}^2$ .....	65
Figura 5-16	Relación entre el criterio de balance BIAS y el parámetro $X_5$ .....	66
Figura 5-17	Comparación entre el criterio de balance obtenido sin considerar el parámetro $X_5$ en la simulación de caudales (BIAS), y considerando el parámetro $X_5$ ( $\text{BIAS}_{X_5}$ ).....	66
Figura 5-18	Relación entre la elevación de la elevación de la cuenca y el parámetro $X_5$ . (a) Considerando la elevación a la salida de la cuenca; (b) Considerando la elevación promedio de la cuenca .....	67
Figura 5-19	Valor obtenido para el criterio de Nash en las estaciones, al simular caudales considerando el ciclo anual de la evaporación potencial. (a) Distribución espacial de los valores de Nash; (b) Histograma de los valores de Nash.....	68

Figura 5-20	Histogramas para el criterio de Nash obtenido al simular caudales considerando el ciclo anual de la evaporación potencial, para estaciones con un área de drenaje: (a) $A < 200 \text{ km}^2$ ; (b) $200 \text{ km}^2 \leq A < 1000 \text{ km}^2$ ; (c) $1000 \text{ km}^2 \leq A < 2000 \text{ km}^2$ ; (d) $A \geq 2000 \text{ km}^2$ .....	68
Figura 5-21	Comparación del caudal medio de largo plazo estimado a partir del balance hídrico de largo plazo y el modelo GR2M utilizando el ciclo anual de la evaporación potencial .....	69
Figura 6-1	Ubicación de las cuencas de las estaciones de caudal donde $\text{Nash} \geq 70\%$ . Las estaciones se identifican por el correspondiente código asignado por el IDEAM .....	70
Figura 6-2	Localización de 5 estaciones de caudal ubicadas sobre los ríos Cauca y Magdalena....	71
Figura 6-3	Caudales estimados y observados para el período 1975 -2005 para 5 estaciones de caudal ubicadas sobre los ríos Cauca y Magdalena .....	72
Figura 6-4	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2314702.....	74
Figura 6-5	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2123702.....	74
Figura 6-6	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2624701.....	74
Figura 6-7	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2613712.....	75
Figura 6-8	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2614704.....	75
Figura 6-9	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2402701.....	75
Figura 6-10	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2402703.....	76
Figura 6-11	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2401758.....	76

Figura 6-12	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2312702.....	76
Figura 6-13	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2312706.....	77
Figura 6-14	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2312701.....	77
Figura 6-15	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2312707.....	77
Figura 6-16	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3525704.....	78
Figura 6-17	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3526708.....	78
Figura 6-18	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3526702.....	78
Figura 6-19	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3215701.....	79
Figura 6-20	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3512701.....	79
Figura 6-21	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3512703.....	79
Figura 6-22	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3517702.....	80
Figura 6-23	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3209701.....	80

Figura 6-24	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3208704.....	80
Figura 6-25	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3210701.....	81
Figura 6-26	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3511701.....	81
Figura 6-27	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3512702.....	81
Figura 6-28	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3501702.....	82
Figura 6-29	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3510703.....	82
Figura 6-30	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3207707.....	82
Figura 6-31	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3207708.....	83
Figura 6-32	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3510702.....	83
Figura 6-33	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3510704.....	83
Figura 6-34	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3501704.....	84
Figura 6-35	Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3502714.....	84



Figura 6-36 Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3521702.....	84
Figura 6-37 Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3521706.....	85
Figura 6-38 Variación temporal de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 4607701.....	85
Figura 6-39 Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2314702.....	87
Figura 6-40 Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2123702.....	87
Figura 6-41 Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2613712.....	87
Figura 6-42 Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2614704.....	88
Figura 6-43 Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2402701.....	88
Figura 6-44 Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2402703.....	88
Figura 6-45 Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2401758.....	89
Figura 6-46 Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2312702.....	89
Figura 6-47 Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2312706.....	89

Figura 6-48	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2312701.....	90
Figura 6-49	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2312707.....	90
Figura 6-50	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 2624701.....	90
Figura 6-51	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3525704.....	91
Figura 6-52	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3526708.....	91
Figura 6-53	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3526702.....	91
Figura 6-54	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3215701.....	92
Figura 6-55	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3512701.....	92
Figura 6-56	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3512703.....	92
Figura 6-57	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3517702.....	93
Figura 6-58	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3209701.....	93
Figura 6-59	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3208704.....	93

Figura 6-60	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3210701.....	94
Figura 6-61	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3511701.....	94
Figura 6-62	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3512702.....	94
Figura 6-63	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3501702.....	95
Figura 6-64	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3510703.....	95
Figura 6-65	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3207707.....	95
Figura 6-66	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3207708.....	96
Figura 6-67	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3510702.....	96
Figura 6-68	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3510704.....	96
Figura 6-69	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3501704.....	97
Figura 6-70	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3502714.....	97
Figura 6-71	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3521702.....	97

Figura 6-72	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 3521706.....	98
Figura 6-73	Ciclo anual de la Precipitación ( $P$ ), Evaporación Real ( $E_s$ ), almacenamiento en el tanque de producción ( $S$ ) y en el tanque de tránsito ( $R$ ), caudal observado ( $Q_o$ ) y estimado ( $Q_s$ ), para la cuenca de la estación 4607701.....	98
Figura 6-74	Casos en los cuales $P < E_s$ , (a) Número de cuencas para cada mes del período 1975 – 2005, donde $P < E_s$ ; (b) Histograma para el número de cuencas donde $P < E_s$ .....	99
Figura 6-75	Casos en los cuales $P < E_s$ para años El Niño, La Niña y años donde no hay ocurrencia del ENSO. (a) Número de cuencas para cada mes del período 1975 – 2005, donde $P < E_s$ ; (b) Histograma para el número de cuencas donde $P < E_s$ .....	99
Figura 6-76	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y caudales observados $Q$ (línea negra Y) en la cuenca de la estación Humapo (código 3511701). Los datos faltantes de caudal se completaron con los valores de los caudales simulados .....	101
Figura 6-77	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y los caudales (línea negra Y) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2314702.....	102
Figura 6-78	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y los caudales (línea negra Y) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2123702.....	103
Figura 6-79	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y los caudales (línea negra Y) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2624701 .....	103
Figura 6-80	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y los caudales (línea negra Y) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2613712.....	103
Figura 6-81	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y los caudales (línea negra Y) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2614704.....	104
Figura 6-82	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y los caudales (línea negra Y) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2402701 .....	104
Figura 6-83	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y los caudales (línea negra Y) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2402703 .....	104
Figura 6-84	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y los caudales (línea negra Y) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2401758.....	105
Figura 6-85	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y los caudales (línea negra Y) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2312702.....	105
Figura 6-86	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja X) y los caudales (línea negra Y) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2312706.....	105

Figura 6-87	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2312701 .....	106
Figura 6-88	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 2312707 .....	106
Figura 6-89	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3525704 .....	106
Figura 6-90	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3526708 .....	107
Figura 6-91	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3526702 .....	107
Figura 6-92	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3215701 .....	107
Figura 6-93	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3512701 .....	108
Figura 6-94	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3512703 .....	108
Figura 6-95	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3517702 .....	108
Figura 6-96	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3209701 .....	109
Figura 6-97	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3208704 .....	109
Figura 6-98	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3210701 .....	109
Figura 6-99	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3511701 .....	110
Figura 6-100	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3512702 .....	110
Figura 6-101	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3501702 .....	110
Figura 6-102	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3510703 .....	111

Figura 6-103	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3207707 .....	111
Figura 6-104	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3207708 .....	111
Figura 6-105	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3510702 .....	112
Figura 6-106	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3510704 .....	112
Figura 6-107	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3501704 .....	112
Figura 6-108	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3502714 .....	113
Figura 6-109	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3521702 .....	113
Figura 6-110	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 3521706 .....	113
Figura 6-111	Curva Residual de masa para los para la los suministros ( $P - E$ ) (línea roja $X$ ) y los caudales (línea negra $Y$ ) (a) Observados y (b) Simulados, en la cuenca de la estación 4607701 .....	114
Figura 6-112	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2314702: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	114
Figura 6-113	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2123702: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	115
Figura 6-114	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2624701: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	115
Figura 6-115	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2613712: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	115
Figura 6-116	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2614704: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	116
Figura 6-117	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2402701: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	116
Figura 6-118	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2402703: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	116

Figura 6-119	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2401758: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	117
Figura 6-120	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2312702: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	117
Figura 6-121	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2312706: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	117
Figura 6-122	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2312701: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	118
Figura 6-123	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 2312707: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	118
Figura 6-124	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3525704: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	118
Figura 6-125	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3526708: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	119
Figura 6-126	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3526702: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	119
Figura 6-127	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3215701: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	119
Figura 6-128	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3512701: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	120
Figura 6-129	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3512703: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	120
Figura 6-130	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3517702: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	120
Figura 6-131	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3209701: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	121
Figura 6-132	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3208704: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	121
Figura 6-133	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3210701: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	121
Figura 6-134	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3511701: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	122

Figura 6-135	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3512702: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	122
Figura 6-136	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3501702: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	122
Figura 6-137	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3510703: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	123
Figura 6-138	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3207707: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	123
Figura 6-139	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3207708: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	123
Figura 6-140	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3510702: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	124
Figura 6-141	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3510704: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	124
Figura 6-142	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3501704: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	124
Figura 6-143	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3502714: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	125
Figura 6-144	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3521702: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	125
Figura 6-145	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 3521706: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	125
Figura 6-146	Almacenamiento del agua en la cuenca vs. Caudal, para la cuenca de la estación 4607701: (a) Caudales observados; (b) Caudales simulados .....	126
Figura 6-147	Efecto de histéresis en la relación entre el almacenamiento y la descarga en un tramo de la red (Tomado de Boroughs y Zagona, 2002) .....	127
Figura 7-1	Evaporación real media multianual estimada a partir de los mapas de evaporación potencial de Thornthwaite y de la ecuación de Budyko.....	128
Figura 7-2	Evaporación real media multianual estimada a partir de la ecuación de Turc.....	129



Figura 7-3	Comparación entre el mapa evaporación obtenido a partir del modelo con los resultados obtenidos con las ecuaciones de Turc y Budyko: (a) $\Delta_{(\text{Thornthwaite-Budyko})} = E_{s(\text{GR2M})} - E_{s(\text{Thornthwaite-Budyko})}$ ; (b) $\Delta_{(\text{Turc})} = E_{s(\text{GR2M})} - E_{s(\text{Turc})}$ .....	130
Figura 7-4	Histogramas obtenidos para los valores de $\Delta_{(\text{Thornthwaite-Budyko})}$ y $\Delta_{(\text{Turc})}$ en las laderas de la zona de estudio .....	130
Figura 7-5	Relación adimensional entre la evaporación real ( $E_s$ ) y potencial ( $E$ ) para la ecuación Turc y Budyko .....	131
Figura 7-6	Comparación entre la evaporación potencial estimada con la ecuación de Thornthwaite y la evaporación potencial en la ecuación de Turc (parámetro $L$ ) .....	131
Figura 7-7	Comportamiento de la evaporación relativa $E_s/E$ como una función de la tasa de almacenamiento $S_I/X_I$ y de la relación $E/X_I$ .....	132
Figura 7-8	Histograma de los valores obtenidos en las laderas de la zona de estudio, para la relación entre el promedio de la evaporación potencial y el parámetro $X_I$ .....	133
Figura 7-9	Relación adimensional entre la evaporación real y potencial para las laderas zona de estudio (puntos negros) y para la ecuación de Budyko (línea continua roja) .....	134
Figura 7-10	Clasificación la zona de estudio de acuerdo a los diferentes grados de aridez.....	134
Figura 7-11	Distribución espacial de la relación entre: (a) la evaporación potencial y la precipitación ( $E/P$ ); (b) la evaporación real y la precipitación ( $E_s/P$ ). $E$ , $E_s$ y $P$ son los promedios multianuales de la evaporación potencial, la evaporación real y la precipitación respectivamente. Las zonas más azules son las áreas más húmedas, y las zonas más rojas son las áreas más secas .....	135
Figura 7-12	Relación adimensional entre la evaporación real y potencial para: (a) Región 1; (b) Región 2; (c) Región 3; (d) Región 4; (e) Región 5; (f) Región 6; (h) Región 7.....	136
Figura A-1	Explorador de base de datos de HidroSIG 4.0: (a) Conexión a una base de datos; (b) Visualización de los elementos contenidos en la base de datos .....	140
Figura A-2	Visualización en HidroSIG 4.0 de capas almacenadas en la base de datos.....	141
Figura A-3	Explorador de series de tiempo en HidroSIG 4.0: (a) Visualización Buscar sitios de medición; (b) visualización de una serie de tiempo asociada a una estación .....	142

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1	Ciclo anual del gradiente de temperatura estimado para la zona de estudio .....	35
Tabla 3-2	Valor promedio para cada región y para toda la zona de estudio de la RMSE (°C) calculada entre la temperatura observada y la temperatura estimada con los diferentes métodos evaluados .....	36
Tabla 3-3	Valor promedio para cada región y para toda la zona de estudio de la RMSE (°C) calculada entre la temperatura observada y la temperatura estimada con la metodología seleccionada .....	38
Tabla 4-1	Promedio ponderado del criterio de Nash, estimado durante el período de validación. Se dio mayor peso a las estaciones con mayor área de drenaje.....	48
Tabla 4-2	Desempeño del modelo durante el período de validación en 8 estaciones de caudal .....	52
Tabla 5-1	Raíz cuadrática media y cuantiles de los errores relativos en porcentaje, del caudal medio de largo plazo estimado a partir del balance hídrico de largo plazo, en 251 estaciones de caudal .....	61
Tabla 5-2	Raíz cuadrática media y cuantiles de los errores relativos en porcentaje, del caudal medio de largo plazo estimado a partir del modelo GR2M, en 251 estaciones de caudal .....	61
Tabla 5-3	Raíz cuadrática media y cuantiles de los errores relativos en porcentaje, del caudal medio de largo plazo estimado a partir del modelo GR2M utilizando el ciclo anual de la evaporación potencial .....	69
Tabla 6-1	Valores obtenidos para los criterios de evolución en las estaciones de las cuencas seleccionadas .....	73
Tabla 6-2	Comparación entre el error del balance hídrico de largo plazo ( $Error_B$ ) y el término $\overline{ST} - \overline{S(0)}/N$ en las cuencas de las estaciones seleccionadas. Período evaluado 1976 – 2005; $N = 30$ años .....	102
Tabla 7-1	Límites que definen los grados de aridez (UNEP, 1992). $P$ y $E$ son los promedios multianuales de la precipitación y la evaporación potencial respectivamente .....	134

## 1 INTRODUCCIÓN

Dentro del enfoque tradicional de la ingeniería en los recursos hidráulicos, se ha hecho énfasis en aquellas componentes del ciclo hidrológico que inciden sobre problemas humanos como el suministro de agua y la protección contra eventos extremos, sin embargo, debido a la escasez de mediciones y registros de variables hidrológicas, surgen importantes problemas relacionados con la predicción en cuencas sin información.

Colombia, localizado al noroeste de Sur América, exhibe características hidrológicas, geomorfológicas y climatológicas complejas (Poveda et al., 2007a). Sumado a esto, en el país existe una gran limitación en cuanto a la cantidad y calidad de información de variables hidrológicas. Dadas estas condiciones, es clara la necesidad de desarrollar metodologías apropiadas para estimar variables hidrológicas en ambientes tropicales, teniendo en cuenta la escasez de información. Por tal motivo, y considerando la importancia que tiene conocer el régimen de caudales en la planificación de los recursos hidráulicos, en este trabajo se propone realizar la reconstrucción histórica de los caudales mensuales a lo largo de la red de drenaje de Colombia.

Realizar la reconstrucción histórica de los caudales mensuales permitirá tener una mejor estimación de la distribución espacial y temporal de la oferta del recurso hídrico, y servirá para mejorar el conocimiento que se tiene sobre la hidrología Colombiana. Los resultados obtenidos de éste trabajo serán de gran utilidad en estudios ambientales, en la formulación de planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas, en programas de aprovechamiento del recurso hídrico, en la evaluación de sequías y en diferentes sectores de la vida nacional.

En las últimas décadas se han desarrollado un gran número de modelos para la simulación y predicción de caudales, a partir de registros de otras variables hidrológicas como la precipitación y la evaporación. En general la precipitación constituye la componente más grande en una ecuación de balance de agua, y en muchas regiones es usual que los registros de precipitación sean mucho más abundantes que los registros de caudal, por lo tanto, evaluar los caudales de los ríos a partir de la precipitación ha sido un importante tema de investigación (Xu y Singh, 1998 a).

### 1.1 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se encuentra dividido de la siguiente manera. En el primer capítulo se presentan los objetivos, los antecedentes y la metodología. En esta primera sección se definen los alcances de este trabajo, se brinda una idea general sobre el estado del arte y los resultados obtenidos por otros autores en trabajos anteriores, y se describe el procedimiento seleccionado para llevar a cabo los objetivos propuestos.

En el segundo capítulo se presenta el modelo precipitación-escorrentía para la simulación de caudales mensuales. En esta sección se analiza como el modelo representa los procesos físicos que ocurren en el proceso de transformación de la lluvia en escorrentía, y se describe la estructura de discretización espacial de la cuenca, para estimar caudales en cualquier punto de la red de drenaje. En el tercer capítulo se presenta la información recopilada y se describe la metodología utilizada para la construcción de los mapas requeridos para la implementación del modelo.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El capítulo cuatro corresponde a la calibración y validación del modelo. En esta sección se establece el valor de los parámetros requeridos por el modelo para simular caudales y se evalúa el desempeño del modelo al operar con los parámetros definidos.

En el quinto capítulo se presentan los resultados obtenidos para la simulación de caudales. Se evalúa el desempeño del modelo en la zona de estudio y se analizan las posibles fuentes de error. En el sexto capítulo se examina la relación que existe entre las diferentes componentes del ciclo hidrológico en las cuencas donde el modelo tuvo un mejor desempeño.

En el séptimo capítulo se analiza en términos generales para toda la zona de estudio, los resultados obtenidos para la evaporación real y potencial. Finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones.

### 1.2 OBJETIVOS

#### 1.2.1 Objetivo General

- Realizar la reconstrucción histórica del régimen de caudales a escala mensual sobre la red de drenaje de Colombia para un período mínimo de 20 años.

#### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Proponer un modelo precipitación-escorrentía distribuido que permita estimar los caudales mensuales en cualquier sitio de interés sobre la red de drenaje de Colombia.
- Realizar la reconstrucción de las variables del ciclo hidrológico requeridas con el fin de implementar el modelo precipitación-escorrentía propuesto en el período de interés.
- Analizar cómo el modelo propuesto simula la retroalimentación que existe entre almacenamiento del agua en la cuenca y las diferentes componentes del ciclo hidrológico.
- Integrar e implementar los resultados obtenidos dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG), para poder almacenar y manipular grandes cantidades de información y permitir su búsqueda y visualización, de tal forma que resultados derivados de este trabajo sean útiles para el planeamiento, manejo y gestión del recurso hídrico, y para la estimación de variables y la simulación de escenarios en trabajos futuros.

## 1.3 ANTECEDENTES

### 1.3.1 Modelación del proceso lluvia escorrentía.

Comprender la dinámica de los diferentes procesos físicos que actúan en la transformación de la precipitación en escorrentía en una cuenca, es uno de los grandes desafíos que enfrenta la hidrología, dada la gran variedad de escalas espaciales y temporales que intervienen.

Durante el último siglo, los principios hidrológicos fueron desarrollados con base en experimentos en escalas de laboratorio o parcelas. Sin embargo a escalas mayores para el análisis de los procesos que ocurren en una cuenca, la práctica hidrológica se ha basado principalmente en aproximaciones y relaciones empíricas. En este contexto los modelos precipitación-escorrentía exhiben diferentes problemas (Gupta, 2007):

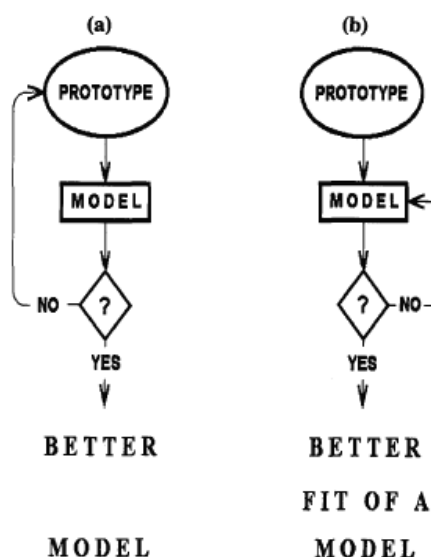
- A partir de mediciones puntuales realizadas en unas pocas estaciones, cómo se pueden extrapolar los datos a escalas mayores para obtener la información de entrada que requieren los modelos precipitación-escorrentía.
- Cómo definir los parámetros y las ecuaciones físicas de los modelos precipitación-escorrentía a las escalas espacio-temporales adecuadas.
- Cómo son evaluados los caudales simulados por un modelo lluvia-escorrentía respecto a los caudales observados.

Respecto a esta última observación, los modelos precipitación-escorrentía tienen un conjunto de parámetros físicos que no pueden ser especificados de antemano a partir de las observaciones disponibles o de la teoría. Estos parámetros se calculan de tal forma que la hidrógrafa de los caudales simulados a la salida de la cuenca, se ajuste de la mejor manera posible a la hidrógrafa de los caudales observados en este punto. Se han usado diferentes criterios estadísticos para determinar un adecuado grado de ajuste (Nash y Sutcliffe, 1970; Perrin et al., 2003) y se han utilizado diferentes técnicas de optimización (Xu y Singh, 1998 a; Ajami et al., 2004). Una vez que los parámetros del modelo han sido calibrados, empleando la hidrógrafa a la salida de la cuenca, no se garantiza que las predicciones de caudales en diferentes puntos al interior de la cuenca sean adecuadas. Centrarse en el ajuste de la hidrógrafa a la salida de la cuenca lleva a una errónea concepción de creer que la respuesta de una cuenca puede ser obtenida a través de una transformación determinística de la precipitación en caudal. Una visión espacial de la cuenca muestra que esta suposición es básicamente falsa (Gupta, 2007). Sin embargo esta práctica común se debe principalmente a la baja disponibilidad de datos de caudal al interior de la cuenca.

Es importante tener en cuenta que las combinaciones óptimas de los parámetros del modelo obtenidas por calibración, no necesariamente corresponden a la realidad en la cuenca, por lo tanto el modelo puede perder su sentido físico. La evaluación de suposiciones físicas realizadas en los modelos es un problema que no ha sido bien apreciado en la literatura. En la Figura 1-1, tomada de Gupta (2007), se ilustra a través de un esquema la diferencia que existe en los dos enfoques que se han dado a este problema. Hoy en día, muchos de los esfuerzos que se han realizado en el desarrollo de modelos precipitación-escorrentía, se han centrado en el problema de la calibración. Tal enfoque deja a un lado la preocupación por hacer avances en la comprensión de la dinámica de los diferentes procesos físicos

que actúan en la transformación de la precipitación en escorrentía en diferentes escalas espacio-temporales.

Los modelos precipitación-escorrentía pueden agruparse en dos grandes grupos: modelos agregados y modelos distribuidos. En el trabajo realizado por Vélez (2001) se puede encontrar una revisión del estado del arte de los modelos precipitación-escorrentía de estos dos tipos. Dentro de las principales limitaciones de los modelos agregados se encuentra la ineficacia para modelar escenarios complejos de producción de escorrentía, solo son aplicables en cuencas pequeñas y en condiciones climatológicas muy específicas, son incapaces de simular campos intermitentes de precipitación y de modelar diferentes tipos de suelo dentro de la cuenca. Por otra parte los modelos distribuidos permiten capturar la variabilidad espacial de las variables hidrológicas y de las condiciones del terreno, sin embargo el proceso de calibración de estos puede llegar a ser muy complejo debido al gran número de parámetros que requieren y a la escasa información disponible para la calibración. Para enfrentar este problema, Francés et al. (2007) proponen una metodología para reducir el número de variables a ser calibradas (número de parámetros del modelo  $\times$  número de celdas o de unidades de discretización espacial) a un pequeño número de factores de corrección común para todas las celdas.



**Figura 1-1** Diferencia entre los procedimientos para: (a) El mejoramiento de un modelo, (b) El mejoramiento en el ajuste de un modelo. (Tomado de Gupta, 2007)

En hidrología los modelos pueden ser clasificados como modelos de caja negra, modelos conceptuales y modelos de base física (Xu y Singh, 1998 a; Vélez, 2001). Los modelos de caja negra o modelos empíricos, poseen una estructura puramente estadística y/o matemática y no ayudan al entendimiento físico de los procesos que ocurren en la cuenca. Los modelos conceptuales, como su nombre lo indica, se basan en una representación conceptual de la cuenca, considerando los procesos físicos en una forma muy simplificada. La mayoría de los modelos conceptuales representan la estructura de la cuenca como un conjunto de tanques o embalses interconectados, y sus ecuaciones deben satisfacer los requerimientos del balance de agua. Debido a que los parámetros del modelo no tienen el mismo significado físico en todas las escalas, es muy importante analizar si el esquema conceptual es adecuado para representar los procesos en la cuenca a la escala espacio-temporal de interés. Por otra

parte, los modelos de base física representan la física del flujo del agua desde su ingreso a la superficie del suelo hasta su salida de la cuenca. Los modelos de base física poseen fundamentos físicos y teóricos muy fuertes y pueden contribuir al entendimiento de los procesos hidrológicos que ocurren en diversas escalas, no obstante existen problemas asociados con su aplicación debido a la dificultad que existe para proveer dichos modelos con la información que requieren.

Aunque actualmente no existen herramientas que permitan resolver muchos de los problemas mencionados previamente, es importante reconocer cuales son las limitaciones en el desarrollo actual de la hidrología, y por lo tanto las limitaciones a las que se encuentra sujeto este trabajo.

### 1.3.2 Modelos escala mensual

En las últimas décadas muchos modelos han sido propuestos para representar la transformación de la precipitación en el caudal a la salida de una cuenca. Cuando el intervalo de tiempo es largo, estos modelos han sido usualmente llamados modelos de balance de agua, asumiendo que el tiempo de respuesta de la cuenca es despreciable comparado el intervalo de tiempo en el cual se está trabajando (Mouelhi et al., 2006).

El uso principal y tradicional de los modelos mensuales de balance de agua ha sido investigar la importancia de diferentes variables hidrológicas en diversas cuencas. En la ingeniería y la hidrología, los modelos mensuales de balance de agua han sido generalmente aplicados en tres campos: reconstrucción de la hidrología de las cuencas, evaluación de impactos de cambio climático, y evaluación de los patrones estacionales y geográficos de suministro y demanda de irrigación (Xu y Singh, 1998 a).

Xu y Singh (1998 a) presentan una revisión del estado del arte de los modelos mensuales de balance de agua en la investigación en recursos hidráulicos. En su trabajo ellos concluyeron que de los diferentes modelos revisados, aquellos que utilizan como datos de entrada la precipitación y la evaporación potencial brindan resultados más confiables para la estimación de caudales mensuales y de otras componentes del balance de agua como la evaporación real, el contenido de humedad en el suelo y el flujo base. En este tipo de modelos se cree que el uso de información diaria como datos de entrada, puede mejorar la estimación de algunos procesos como la intercepción, la infiltración y la evaporación, sin embargo el uso de datos diarios incrementa el nivel de complejidad y limita el alcance de ésta aplicación a algunas pocas cuencas o regiones pequeñas, en lugar de poder realizar cálculos de balance de agua sobre grandes unidades geográficas.

Comparado una hidrógrafa para caudales diarios, con una hidrógrafa para caudales mensuales, se observa que ésta última generalmente no muestra los efectos irregulares de algunos factores naturales de incertidumbre que emergen en una escala temporal diaria u horaria; tales efectos son suavizados usualmente al pasar de una escala diaria a una escala mensual (Xiong y Guo, 1999). En diferentes estudios realizados se ha encontrado que los modelos a escala mensual requieren menor cantidad de parámetros para explicar los fenómenos hidrológicos, a diferencia de los modelos precipitación-escorrentía con una resolución temporal diaria u horaria (Xu y Singh, 1998 a; Xiong y Guo, 1999; Mouelhi et al., 2006). Por su parsimonia inherente, los modelos mensuales de balance de agua se prestan para la regionalización y por ende pueden ser utilizados en cuencas sin información. Debido a su bajo nivel de complejidad, estos deben enfocarse en las características más importantes de la

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

transformación de la precipitación en escorrentía, y dado que son muy simples, son fácilmente manipulados.

La interrelación entre la precipitación, la evaporación y la escorrentía, en una escala mensual, parece ser muy cerrada debido a los efectos mutuos y continuas retroalimentaciones de todos los tipos de movimiento de agua en el medio suelo-planta-atmósfera (Xiong y Guo, 1999). La escorrentía mensual está estrechamente relacionada al contenido de agua en el suelo. Milly y Dunne (1994) encontraron que para un incremento de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, la evaporación de las superficies continentales aumenta y la escorrentía disminuye, porque una alta capacidad de almacenamiento mejora la habilidad del suelo para almacenar agua de períodos de exceso para su posterior evaporación durante períodos de escasez. De esta forma, si la capacidad de retención de agua en el suelo es grande, la precipitación podría ser almacenada y más tarde liberada por evaporación, y si es pequeña, mucha escorrentía podría ocurrir y el suelo podría secarse y ser inadecuado para suministrar agua para la evaporación.

### 1.3.3 Experiencias en Colombia

En los modelos hidrológicos conceptuales, el efecto regulador de una cuenca sobre la lluvia es asumido para operar como un embalse lineal o no lineal. Algunos ejemplos son el modelo agregado GR2M (Makhlouf y Michel, 1994; Mouelhi et al., 2006), empleado para estimar caudales mensuales, el modelo de tanques propuesto en el proyecto Balances Hidrológicos de Colombia (Vélez et al., 2000), y el modelo de interacción suelo-atmósfera propuesto por Vélez et al. (2002). El modelo GR2M ha sido utilizado para reconstruir series mensuales de caudal en diferentes subcuencas de la cuenca del río Bogotá (UNALMED, 2006), mientras que los dos últimos corresponden a modelos distribuidos que han sido empleados para estimar caudales medios mensuales multianuales en todo el territorio Colombiano.

El modelo desarrollado en el proyecto Balances Hidrológicos de Colombia (Vélez et al., 2000) consiste en un modelo de tanques a escala mensual distribuido. En el esquema del modelo, presentado en la Figura 1-2, el primer tanque (ubicado a la izquierda) se encuentra asociado al almacenamiento capilar en el suelo, y está caracterizado por un parámetro que representa la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, mientras que la parte correspondiente al submodelo de tránsito que da como resultado la escorrentía, está representado con un tanque lineal de constante  $K$ . Este modelo fue aplicado sobre un Modelo de Elevación Digital (MED) con una resolución de 5 minutos de arco, y se emplearon como datos de entrada los mapas previamente elaborados en dicho proyecto para el ciclo anual de la precipitación y la evaporación potencial. En este modelo cada píxel del MED representa un volumen de control, de esta forma, cada celda se considera como una unidad de producción de escorrentía y se clasifica en función de la capacidad de almacenamiento capilar del suelo y el tiempo de residencia del agua. Para calcular los valores de caudal mensual en una cuenca, en el modelo se realiza una agregación espacial simple de los valores mensuales de escorrentía de las celdas que pertenecen a la cuenca en cuestión, considerando que para todas las cuencas en Colombia los tiempos de viaje superficial son muy inferiores a un mes.

El modelo de interacción suelo-atmósfera propuesto por Vélez et al. (2002) se usa para la estimación del ciclo anual y series de tiempo de variables relacionadas con el ciclo hidrológico. En el esquema del modelo, presentado en la Figura 1-3, se observan tres tanques que representan, en orden descendente, la dinámica del agua en las hojas, del agua en el suelo y del agua en la cuenca. En este esquema se



observa que, a diferencia del modelo desarrollado en el proyecto *Balances Hidrológicos de Colombia*, se considera la interceptación por parte de la vegetación y se divide la escorrentía en dos componentes, una superficial que sale del volumen de control de manera inmediata (se estima como el 10% del agua de escorrentía), y una componente subsuperficial que se asume que opera como un embalse lineal. El modelo requiere información de precipitación, evaporación potencial, capacidad máxima de retención de agua en el suelo e índice de área foliar. Debido a la parametrización propuesta, el modelo requiere para su ejecución información a una escala temporal detallada (mínimo diaria).

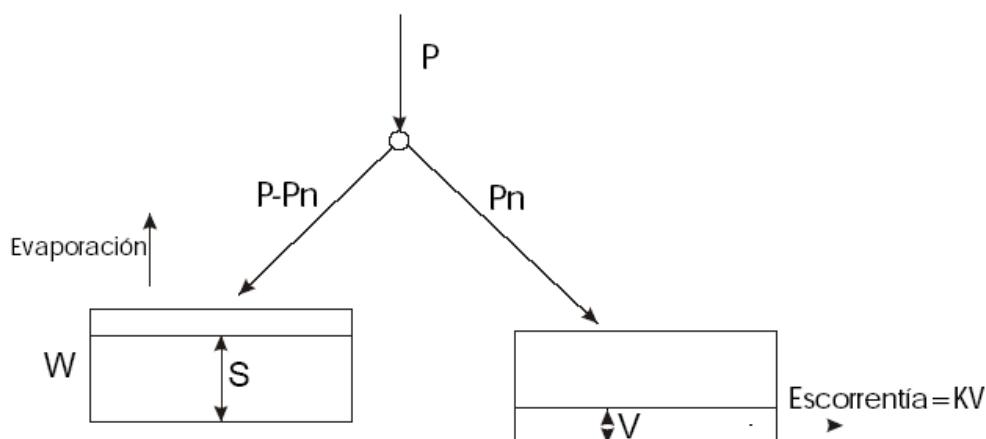


Figura 1-2 Esquema del modelo de tanques propuesto en el proyecto Balances hidrológicos de Colombia (Tomado de Vélez et al., 2000)

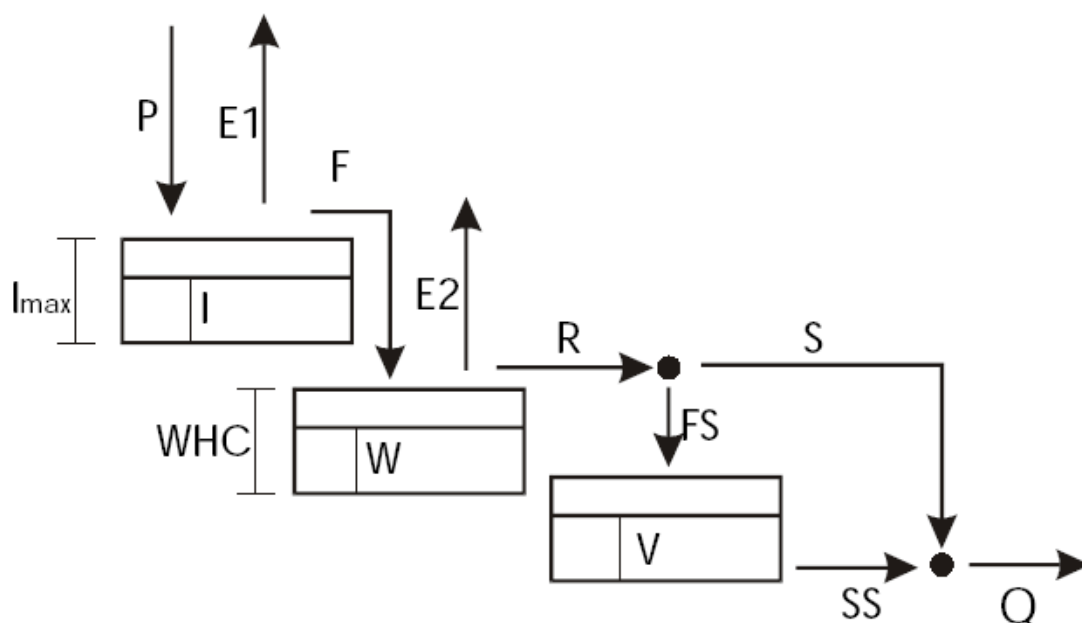
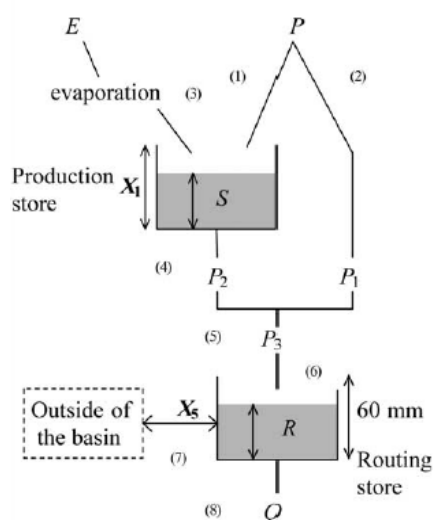


Figura 1-3 Esquema del modelo de interacción suelo-atmósfera (Tomado de Vélez et al., 2002)

En el modelo GR2M (*Global Reservoir* de 2 parámetros, de resolución mensual), la cuenca es considerada como el volumen de control (modelo agregado) y los datos requeridos para estimar los caudales mensuales a la salida de la cuenca son la precipitación y la evaporación potencial. La estructura de este modelo está compuesta por un submodelo de producción de escorrentía, caracterizado por un tanque de producción, y un submodelo de tránsito que representa el efecto regulador de la cuenca (ver Figura 1-4). En la versión del modelo propuesta por Mouelhi et al. (2006), se considera una componente de intercambio de aguas subterráneas, dentro del balance de agua, definida como la resultante de los flujos que atraviesan la columna de suelo del volumen de control.

Mouelhi et al. (2006) evaluaron el modelo GR2M en un gran número de cuencas de diferentes tamaños, cuyas áreas variaban de 1 a 50,600 km<sup>2</sup>, y en diferentes condiciones climáticas que iban desde ambientes semiáridos hasta ambientes húmedos tropicales, y encontraron que éste presentaba un buen desempeño en las diferentes cuencas analizadas. Estos resultados no son una prueba de la validez del modelo, sin embargo indican que el modelo es robusto y puede brindar resultados más confiables que otros modelos reportados en la literatura que fueron desarrollados o evaluados en condiciones muy específicas.



**Figura 1-4** Esquema del modelo GR2M (Tomado de Mouelhi et al., 2006)

Debido a la parsimonia del modelo GR2M, éste resulta atractivo para estudios de regionalización y para la estimación de caudales en regiones de información escasa. Es importante resaltar que la relación entre los parámetros del modelo GR2M y las características de la cuenca es un problema que no fue abordado durante su desarrollo, por lo tanto esta pregunta debe ser considerada cuidadosamente en los estudios de regionalización que se deseen llevar a cabo empleando este modelo.

## 1.4 METODOLOGÍA

Se adopta la estructura del modelo GR2M (Mouelhi et al., 2006) debido a su sencillez y fácil implementación, y se analiza como las diferentes componentes del modelo representan los procesos físicos que ocurren en la cuenca.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Dado que el objetivo principal de este trabajo considera la reconstrucción histórica de los caudales mensuales en cualquier punto de interés a lo largo de la red de drenaje de Colombia, se realiza la desagregación del modelo. Para este fin el espacio se desagrega en laderas y la red de drenaje en segmentos. Este tipo de desagregación permite que el número de parámetros a ser calibrado disminuya, en comparación a los modelos distribuidos tradicionales que modelan como un tanque independiente cada uno de los píxeles que conforman el MED. Como ejemplo, los modelos hidrológicos propuestos por Menabde y Sivapalan (2001) y Mantilla et al. (2006), emplean este mismo tipo de desagregación. En este contexto por ladera se refiere a toda el área que drena a un tramo de la red, y representa el volumen de control sobre el cual es aplicado el modelo.

La región seleccionada como zona de estudio se encuentra comprendida entre las latitudes  $-5^{\circ}$  S y  $15^{\circ}$  N, y las longitudes  $-80^{\circ}$  W y  $-65^{\circ}$  W. La información cartográfica que utilizada se obtuvo de HydroSHEDS (Lehner et al., 2006; Lehner et al, 2008). HydroSHEDS ofrece de manera gratuita, a través de la página WEB [hydrosheds.cr.usgs.gov](http://hydrosheds.cr.usgs.gov), información a escala regional y global que incluye el MED en formato raster para diferentes resoluciones (3, 15 y 30 segundos de arco), el MED libre de zonas planas y sumideros, la red de drenaje, líneas divisorias, mapas de direcciones de drenaje y mapas de flujo acumulado. En principio se trabajará con un MED con una resolución de 30 segundos de arco ( $\sim 1$  km en el ecuador).

Con el fin de implementar el modelo, se recopila información hidrometeorológica de las variables pertinentes. Para la construcción de los mapas mensuales de evaporación potencial se usan las ecuaciones de Turc Modificado, que depende de la temperatura, la radiación solar global incidente y la humedad relativa, y la ecuación de Thornthwaite, que depende únicamente de la Temperatura (Vélez et al., 2000). Respecto a los campos mensuales de precipitación se utilizan los mapas elaborados en el trabajo realizado por Hurtado (2009).

Para estimar los mapas mensuales de temperatura se emplean regresiones lineales con base a la información puntual disponible y al MED, aprovechando la dependencia lineal de la temperatura superficial del aire con la altura sobre el nivel del mar (Chaves y Jaramillo, 1999). Respecto a la radiación y la humedad relativa, se utiliza la información espacial obtenida de estudios de reanálisis y bases de datos que se encuentren disponibles de forma gratuita a través de Internet, como North American Regional Reanalysis (Mesinger et al, 2004) y NCEP/NCAR Reanalysis (Kalnay et al, 1996) y Earth Radiation Budget Experiment (Barkstrom, 1984; Pinker y Laszlo, 1992).

Una vez recopilada la información requerida, se definen el período de calibración y validación del modelo. Durante la calibración se verifican los caudales simulados con los caudales observados en los diferentes puntos de la red de drenaje donde existan registros disponibles. Durante la validación se examina la persistencia del desempeño del modelo al operar con los valores de los parámetros obtenidos en el período de calibración. La calidad de los resultados permite evaluar en cierto grado la validez de la estructura y las suposiciones físicas realizadas por el modelo en cuestión.

Luego de haber calibrado y validado en las regiones con información, se emplean los resultados obtenidos para simular caudales en las cuencas sin información, de tal forma que sea posible estimar los caudales mensuales en todo el territorio Colombiano.

Posteriormente se examinan los resultados obtenidos para otras variables del ciclo hidrológico, como la evaporación real y el contenido de la humedad en el suelo, analizando como varían en el tiempo en

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

respuesta a los suministros y demandas. Finalmente se integran los resultados obtenidos dentro de una plataforma SIG.

## 2 MODELO MENSUAL DE BALANCE DE AGUA

En esta etapa la idea es implementar un modelo distribuido que permita simular caudales mensuales en cualquier punto de la red de drenaje, considerando la variabilidad espacial de la precipitación, la evaporación y las condiciones del suelo.

### 2.1 MODELO GR2M

Como se mencionó en la metodología, se adoptará la estructura del modelo agregado GR2M (Mouelhi et al., 2006), por su sencillez y fácil implementación. En esta sección se presenta la descripción general del modelo (ver Figura 2-1). Todas las cantidades (entradas, salidas y variables internas) están expresadas en mm. En las ecuaciones presentadas a continuación  $P$  y  $E$  representan la precipitación y la evaporación potencial promediadas sobre la cuenca de interés.

Debido a la precipitación, el almacenamiento en el tanque de producción,  $S$ , se convierte en  $S_1$ , obtenido por medio de la siguiente expresión:

$$S_1 = \frac{S + X_1 \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)} \quad (2-1)$$

Donde  $X_1$  representa la máxima capacidad del tanque de producción. El exceso de precipitación,  $P_1$ , se calcula como:

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (2-2)$$

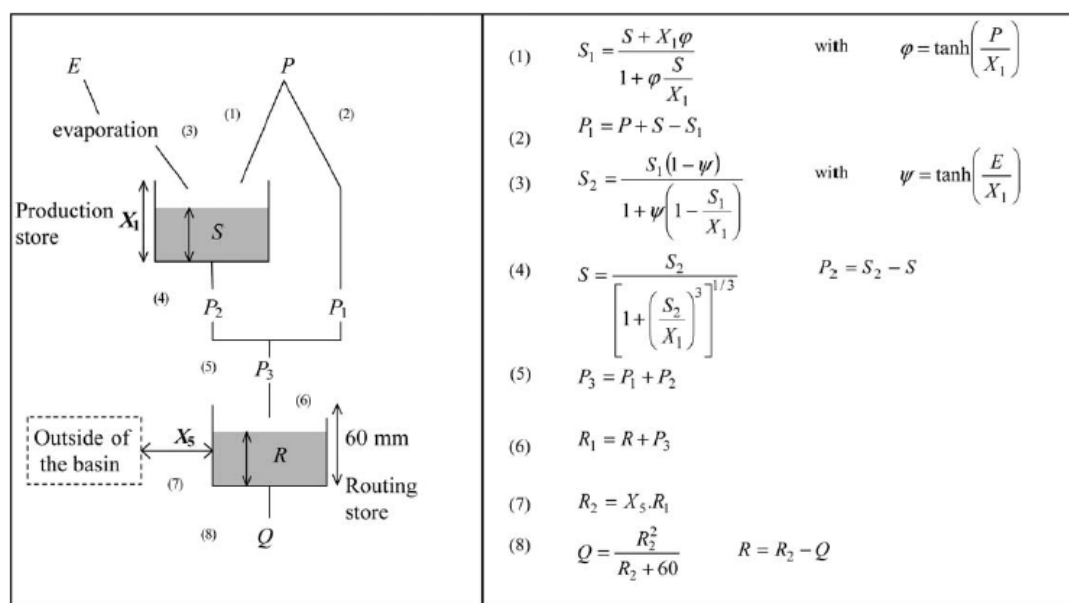
Debido a la evaporación (el cálculo de la evaporación real, depende del valor de  $E$ ),  $S_1$  se convierte en  $S_2$ :

$$S_2 = \frac{S_1 \left(1 - \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad (2-3)$$

Posteriormente, una cantidad de agua  $P_2$  es liberada del tanque de producción como percolación. De esta manera  $S_2$ , toma un nuevo valor  $S$ , el cual representa el almacenamiento inicial en el siguiente mes:

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{\frac{1}{3}}} \quad (2-4)$$

$$P_2 = S_2 - S \quad (2.5)$$



**Figura 2-1 Diagrama del modelo GR2M (Tomado de Mouelhi et al., 2006)**

La suma de  $P_1$  y  $P_2$  es la cantidad de agua que entra en el tanque de tránsito:

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (2-6)$$

El nivel inicial en tanque de tránsito,  $R$ , se actualiza como:

$$R_1 = R + P_3 \quad (2-7)$$

Luego se calcula el término de intercambio de agua  $F$ :

$$F = (X_5 - 1)R_1 \quad (2-8)$$

Donde  $X_5$  es un parámetro adimensional. Si  $X_5$  es mayor que 1,  $F$  representa una ganancia de agua para la cuenca, y si es menor que 1 representa una pérdida. El nuevo nivel en el tanque de tránsito es:

$$R_2 = X_5 \cdot R_1 \quad (2-9)$$

La descarga a la salida de la cuenca de interés se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + X_4} \quad (2-10)$$

Donde  $X_4$  es la máxima capacidad del tanque de tránsito y tiene un valor de 60 mm. Finalmente, el nivel en el tanque de tránsito al inicio del siguiente mes se calcula como:

$$R = R_2 - Q \quad (2-11)$$

Los parámetros que deben ser calibrados en el modelo GR2M son  $X_1$  y  $X_5$ . Como se mencionó en los antecedentes, la relación entre los parámetros del modelo y las características de la cuenca es un problema que no fue abordado durante su desarrollo. A continuación se analiza como el modelo GR2M representa algunos procesos físicos en la cuenca.

### 2.1.1 Almacenamiento de agua en el suelo

El almacenamiento en el tanque de producción representa el contenido de humedad en el suelo (Mouelhi et al., 2006). Con el fin de no dejar el valor de  $X_1$  como un parámetro a calibrar, se podría tomar la máxima capacidad de almacenamiento del tanque de producción igual a la capacidad de retención de agua en el suelo (*soil water holding capacity*). No obstante, esta suposición implica no considerar la cantidad de agua que efectivamente puede ser extraída del suelo por parte de las plantas para satisfacer la demanda de transpiración.

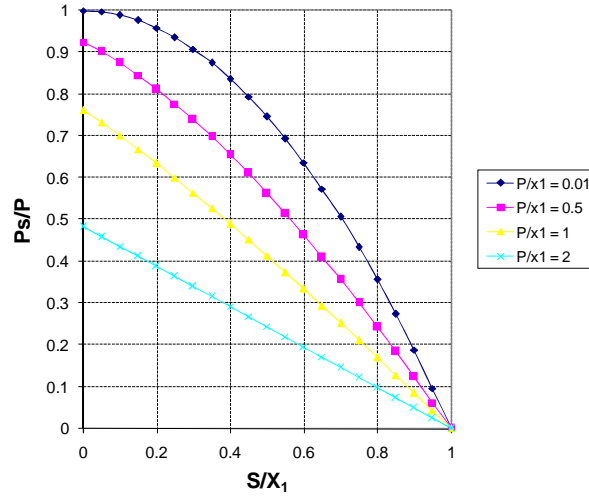
### 2.1.2 Infiltración:

Debido a la precipitación, el almacenamiento inicial en el tanque de producción,  $S$ , se convierte en  $S_1$ , por lo tanto la cantidad de precipitación que entra en éste tanque,  $P_s$ , puede calcularse como:

$$P_s = S_1 - S ; P_s = \frac{S + X_1 \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)} - S$$

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)} \quad (2-12)$$

En la Figura 2-2 se presenta el comportamiento de la tasa de infiltración  $P_s/P$  como una función de la tasa de almacenamiento  $S/X_1$ .



**Figura 2-2** Comportamiento de la tasa de infiltración  $P_s/P$  como una función de la tasa de almacenamiento  $S/X_1$

### 2.1.3 Evaporación real

Debido a que la evaporación directa del suelo o de una superficie abierta de agua, y la transpiración de las plantas no son procesos fáciles de separar, usualmente se denominan en conjunto como evapotranspiración. Aunque en ocasiones estas distinciones pueden ser útiles, el término evaporación es usualmente utilizado para describir todos los procesos de vaporización (Brutsaert, 2005).

Debido a la evaporación, el nivel en el tanque de producción pasa de  $S_1$  a  $S_2$ , por lo tanto la evaporación real estimada por el modelo puede calcularse como:

$$E_s = S_1 - S_2$$

$$E_s = S_1 - \frac{S_1 \left( 1 - \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right) \right)}{1 + \left( 1 - \frac{S_1}{X_1} \right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}$$

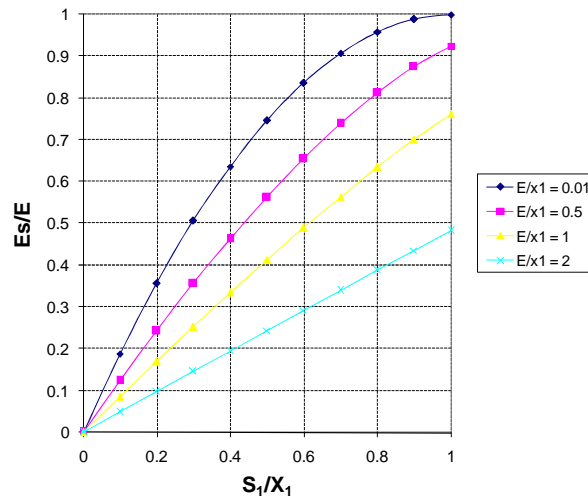
$$E_s = \frac{S_1 \left( 2 - \frac{S_1}{X_1} \right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left( 1 - \frac{S_1}{X_1} \right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad (2-13)$$

En el modelo la evaporación real es función del contenido de humedad en el suelo y la tasa de evaporación potencial. La evaporación potencial es a menudo estimada por medio de datos meteorológicos que fueron observados bajo condiciones no potenciales. Debido a que el aire interactúa



con la superficie subyacente, la evaporación potencial estimada con base en mediciones llevadas a cabo en condiciones no potenciales, debería ser llamada “aparente” para reflejar este hecho (Brutsaert, 2005). Cuando la superficie se seca, la evaporación potencial aparente tiende a aumentar, sin embargo, debido al uso de la función Tangente Hiperbólica sobre la evaporación potencial, en este caso no se produce un producto inestable entre una cantidad muy pequeña con una muy grande.

En la Figura 2-3 se observa que la evaporación real será mayor en la medida que la disponibilidad de agua en el suelo sea mayor, aunque en condiciones saturadas la evaporación real no necesariamente será igual a la potencial.



**Figura 2-3** Comportamiento de la tasa de evaporación  $E_s/E$  como una función de la tasa de almacenamiento  $S_t/X_1$

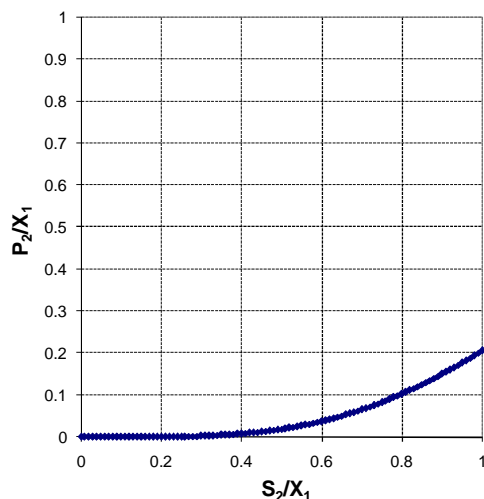
#### 2.1.4 Percolación

De acuerdo al planteamiento del modelo, una cantidad de agua  $P_2$  es liberada del tanque de producción como percolación, de esta forma  $S_2$ , toma un nuevo valor  $S$ , el cual representa el almacenamiento inicial en el siguiente mes:

$$P_2 = S_2 - S ; P_2 = S_2 - \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{\frac{1}{3}}}$$

$$P_2 = S_2 \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{S_2}{X_1} \right)^3 \right]^{-\frac{1}{3}} \right\} \quad (2-14)$$

En la Figura 2-4 se presenta el comportamiento de la tasa de percolación  $P_2/X_1$  como una función de la tasa de almacenamiento  $S_2/X_1$ .



**Figura 2-4** Comportamiento de la tasa de percolación  $P_2/X_1$  como una función de la tasa de almacenamiento  $S_2/X_1$

### 2.1.5 Tránsito de escorrentía

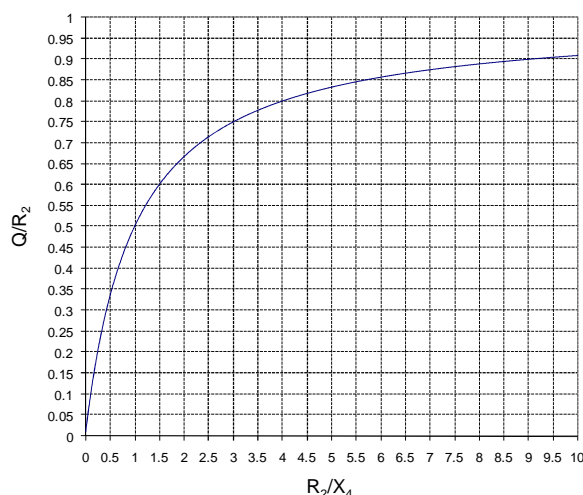
$P_1$  y  $P_2$  pueden asociarse con la escorrentía superficial y subsuperficial respectivamente. La suma de estas dos componentes es la cantidad total de escorrentía que ingresa en el tanque de tránsito, el cual representa el efecto regulador de la cuenca. El submodelo de tránsito no requiere ningún parámetro para ser calibrado. En el desarrollo del modelo GR2M los autores encontraron que al dejar la máxima capacidad de almacenamiento del tanque de tránsito, como un parámetro libre a calibrar, los resultados no mejoraban significativamente, no obstante, valdría la pena verificar si en la región de estudio un valor diferente a  $X_4 = 60$  mm conduce a mejores simulaciones. En la Figura 2-5 se presenta la tasa de descarga del tanque de tránsito  $Q/R_2$ , en función de la tasa de almacenamiento  $R_2/X_4$ . Se observa que la respuesta del tanque de tránsito es más lenta para valores pequeños de  $R_2/X_4$ .

### 2.1.6 Flujo de agua subterránea

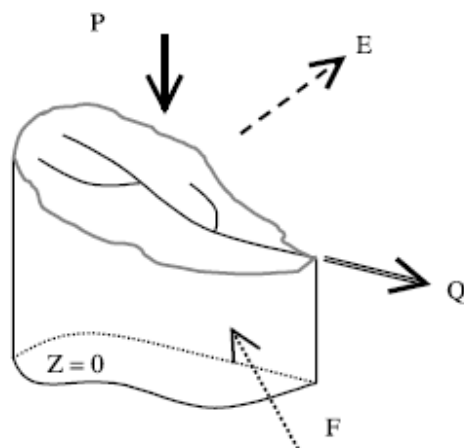
Dentro del modelo, se considera una componente de intercambio de aguas subterráneas ( $F$ ) dentro del balance de agua, definida como la resultante de los flujos que atraviesan la columna de suelo del volumen de control (ver Figura 2-6). En el largo plazo es claro que el cambio en la cantidad de agua almacenada en el suelo es despreciable respecto a los otros términos del balance hídrico (Poveda et al., 2007a), sin embargo, a escala mensual, los resultados encontrados por Mouelhi et al. (2006) indican que dicha componente probablemente es una característica importante en el modelamiento del balance de agua a escala mensual y por lo tanto no debería ser despreciada, no obstante, debido a la falta de información que permita evaluar la amplitud y la dinámica del flujo subterráneo, la hipótesis acerca de la existencia de  $F$  sólo puede evaluarse indirectamente a partir de los datos caudal disponibles.

Al considerar valores de  $F$  diferentes de cero, es importante garantizar resultados coherentes. Por ejemplo, si en una cuenca se está “perdiendo” cierta cantidad de agua (valor de  $F$  negativo), entonces

en una cuenca vecina se debe estar “ganando” dicha cantidad, o si en algún punto se está perdiendo agua, aguas abajo se debe estar recuperando, de tal forma que la resultante final de  $F$  dentro de la región evaluada sea cero.



**Figura 2-5** Comportamiento de la tasa de descarga del tanque de tránsito  $Q/R_2$  como una función de la tasa de almacenamiento  $R_2/X_4$

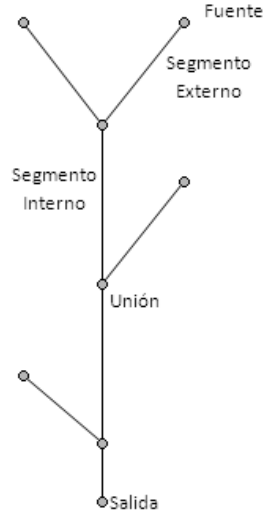


**Figura 2-6** Esquema tridimensional de una cuenca presentado por Mouelhi et al. (2006). P es la precipitación, E la evaporación potencial, Q es el caudal a la salida de la cuenca, F (perdida o ganancia) resultante de todos los flujos que atraviesan el límite lateral de la columna de suelo.

## 2.2 DESAGREGACIÓN DEL MODELO

La red de drenaje se discretizará en segmentos y el espacio se discretizará en laderas, tal como se presenta en el trabajo realizado por Mantilla (2003). Para la desagregación de la red de drenaje, se asumirá que ésta puede ser representada como un árbol binario finito con una única raíz (ver Figura 2-7). Una unión se define como un vértice interno en el cual se unen 3 segmentos. Una fuente es un vértice externo en el cual comienza un segmento no ramificado. Un segmento es un tramo entre dos vértices. Este árbol binario define un sistema de transporte con una única salida común (raíz del árbol).

Para la discretización de la cuenca, se referirá por ladera a toda el área que drena a un segmento en particular de la red de drenaje (ver Figura 2-8).



**Figura 2-7** Esquema de un árbol binario y sus partes



**Figura 2-8** Esquema de una cuenca dividida en laderas (Tomado de Mantilla, 2003)

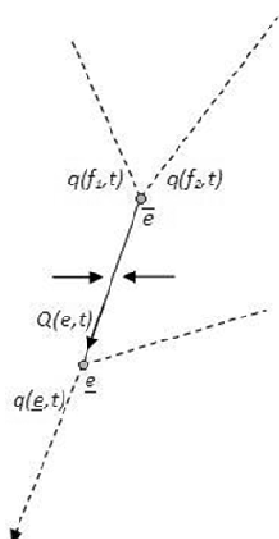
En este contexto, cada segmento transporta agua desde su vértice superior hasta su vértice inferior, y cada ladera de la cuenca es un volumen de control sobre el cual será aplicado el modelo GR2M. En el esquema de la Figura 2-9 se considera como volumen de control a la ladera que drena al segmento  $e$ . El caudal en el vértice inferior  $\underline{e}$  está dado por la suma de los flujos de entrada provenientes de los tramos que convergen al vértice superior  $\overline{e}$ , que se denotan  $q(f_1, t)$  y  $q(f_2, t)$ , y por el caudal producido en la ladera del tramo  $e$ ,  $a_e Q(e, t)$ , donde  $a_e$  es el área de la ladera y  $Q(e, t)$  es la descarga obtenida al aplicar el modelo GR2M sobre la ladera:

$$q(\underline{e}, t) = a_e Q(e, t) + \sum_{f: \overline{f} = \overline{e}} q(f, t) \quad (2-15)$$

La selección del modelo conceptual aquí presentado, implica trabajar bajo diferentes hipótesis como las siguientes:

- El sistema suelo-vegetación se comporta como un embalse, cuyo contenido varía en respuesta a las fluctuaciones de los suministros y demandas.
- Es posible conceptualizar la cuenca como un ensamble de tanques interconectados con capacidad para almacenar y/o liberar agua.
- Se trabajará bajo la suposición de que el caudal es constante dentro de cada tramo de la red de drenaje.
- El caudal mensual a la salida de una cuenca, se puede calcular a partir de la agregación espacial simple de los valores mensuales de caudal generados en cada una de las laderas pertenecientes a la cuenca. Esta simplificación implica asumir que para todas las cuencas de la zona de estudio los tiempos de viaje superficial son muy inferiores a un mes (Vélez et al., 2000).

Se está asumiendo además que la estructura del modelo GR2M es adecuada para estimar caudales a escala de ladera. Para una red de drenaje extraída de un MED con una resolución de 30'' el área mínima que se puede encontrar para una ladera es aproximadamente 1 km<sup>2</sup> (caso en el cual la ladera está conformada por un sola celda). Como se mencionó en los Antecedentes, el desempeño del modelo GR2M fue evaluado en cuencas de diferentes tamaños, cuyas áreas variaban de 1 a 50,600 km<sup>2</sup>, sin embargo esto no implica la validez del modelo para trabajar a escala de ladera. Este tipo de suposiciones deben ser consideradas al analizar los resultados.



**Figura 2-9** Esquema del volumen de control del sistema segmento-ladera

## 2.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Se elaboró un código, en el lenguaje de programación de MATLAB 7.4.0 (R2007a), para la ejecución del modelo (el algoritmo correspondiente no se presenta en este trabajo). El programa elaborado sirve para emplear el modelo en cuencas extraídas de MED en formato raster: En primer lugar se divide la cuenca en laderas con base en la red de drenaje y el mapa de direcciones de drenaje; posteriormente se

## CAPÍTULO 2. MODELO MENSUAL DE BALANCE DE AGUA

estima el valor promedio sobre cada ladera de los diferentes campos y mapas de entrada requeridos para cada intervalo de tiempo; finalmente se procede a utilizar el modelo para la simulación de caudales.